

## ФЕНОМЕНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ РАМНИХ ДВОТАВРІВ З ГНУЧКОЮ СТІНКОЮ

Зменшення товщини стінки в двотаврових конструкціях при переважній роботі на згин досить давно розглядається вченими через підвищену ефективність таких конструкцій. Але дослідження їх роботи історично було сконцентровано навколо балкових систем. В той же час робота рамних конструкцій, у яких досить широко використовуються двотаврові перерізи (постійної чи змінної жорсткості), поки що носила поверхневий характер і нормативних рекомендацій щодо розрахунку рамних двотаврів з гнучкими стінками не існує. В сучасній літературі більшість авторів пропонує розглядати такі конструкції як балкові та розраховувати за методикою розділу 18 [1]. Але таке припущення є не зовсім обґрунтованим. У нововведеному ДБН [2] це питання також залишається невирішеним. В той же час практика застосування конструкцій з підвищеною гнучкістю стінки в рамних каркасах у будівельному виробництві таких країн, як Росія, Чехія, Австрія, Германія, США та ін. доводить їх працездатність. Власні дослідження автора [3, 4] показали, що використовуючи тонкостінні двотаври у рамах при високих значеннях відносного ексцентриситету  $m_{ef} \geq 15$  можна досягти до 17% економії металу порівняно з аналогічними перерізами з традиційною гнучкістю стінки. Єдиною перешкодою на шляху впровадження цієї конструктивної форми у практику вітчизняного будівництва є відсутність об'єктивної нормативної бази для розрахунку.

Через це існує необхідність проведення ряду досліджень щодо роботи рамних конструкцій двотаврового перерізу з гнучкою стінкою та розробка рекомендацій щодо їх проектування.

Особливість роботи рамних двотаврів з гнучкою стінкою викликана поведінкою тонкої стінки під навантаженням. Традиційно несуча спроможність двотаврів

вважається вичерпаною при досягненні напруженнями в стінці своїх критичних значень – відбувається місцева втрата стійкості. Але аналіз закритичної поведінки гнучкої пластини показав, що переріз при цьому переходить до нового стійкого стану рівноваги, тож несуча здатність елемента в цілому не вичерпується. Тому урахування закритичної роботи стінки у двотавровому перерізі дозволяє підвищити внутрішній ресурс несучої здатності і, як наслідок, ефективність конструкції в цілому. Питання роботи гнучких оконтурених пластин після втрати стійкості розглядалось ученими починаючи з робіт П.Ф. Папковича, П.А. Соколова, А. Феппля, Th. Karman'а та І.Г. Бубнова. Теоретичні дослідження будівельних тонкостінних балок та рам розділялись на два напрями.

В основі методів першого напрямку лежить побудова умовної статично допустимої моделі граничного стану. Виникнення такого підходу зумовлено експериментально встановленим характером роботи конструкцій та поліморфізмом граничних станів тонкостінних двотаврів. Перевагами цього феноменологічного підходу є висока прагматична націленість на вирішення інженерної задачі розробки методики розрахунку тонкостінних балок.

Найбільшу популярність набув метод, запропонований американськими дослідниками К. Basler'ом і В. Thurlimann'ом [5]. Для відсіків, схильних до чистого зсуву, граничне значення зсувного навантаження вчені уявляють як суму критичного навантаження і додаткового навантаження, що сприймається в закритичній стадії. При дослідженні відсіків балок з гнучкими стінками на поперечне випинання автори прийняли модель, у якій частина стиснутої стінки втрачає стійкість і виключається з роботи, а частина ефективної ширини стиснутої зони, що залишилася, дорівнює  $30t$ . Граничний стан відсіку

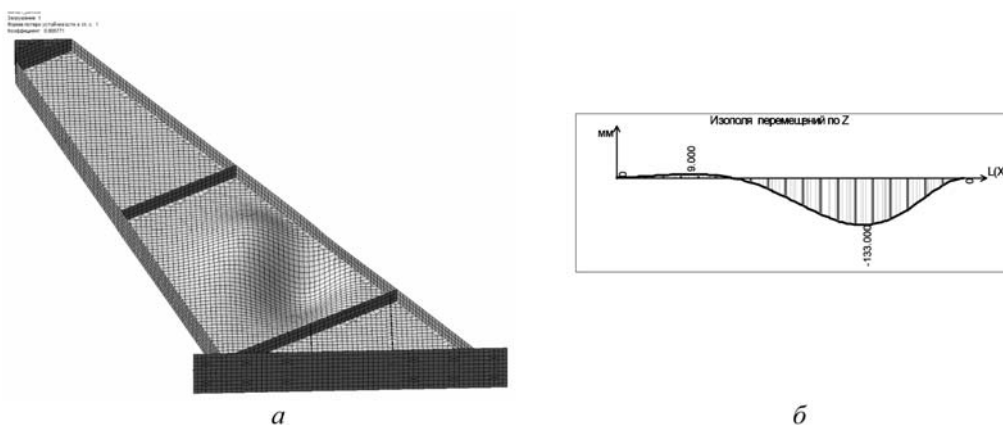


Рис. 1. Характер втрати стійкості стінки чисельної моделі за 1-ю формою у середовищі програмного комплексу Лира 9.6 (а) та деформації стінки на відстані 300 мм від поперечного ребра (б)

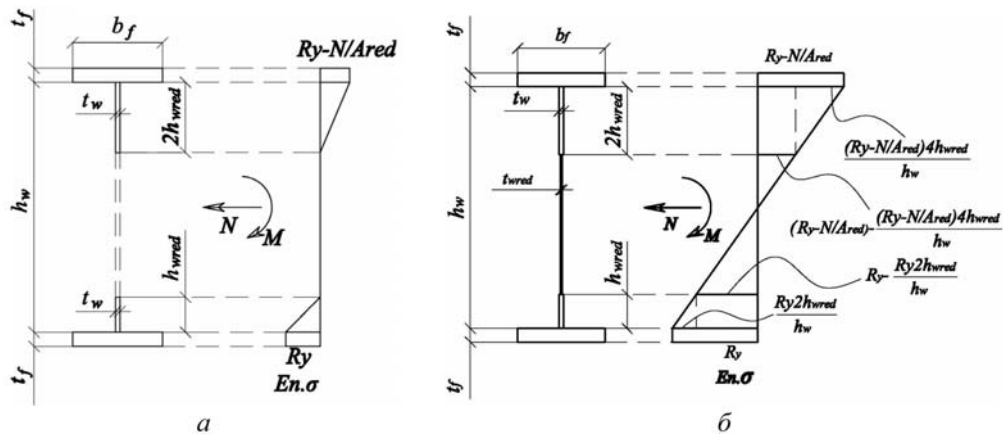


Рис. 2. Розрахунковий переріз рами з гнучкою стінкою без урахування роботи стінки (а) та при урахуванні редукованої товщини стінки (б). Епюра нормальних напружень в перерізі

залежить від несучої здатності стиснутої таврової частини перерізу, яка при досягненні у ній напружень, рівних межі текучості, може втрачати стійкість в площині та поза площиною згину. Однак метод Баслера-Тюрлімана не враховує впливу жорсткості поясів на закритичну стадію роботи відсіків при зсуві та згині. Не до кінця доведеними виявилися і висновки, зроблені дослідниками щодо призначення граничної гнучкості стінки. Незважаючи на зазначені недоліки, наведений метод одержав широку популярність і був покладений до основи норм проектування тонкостінних балок Американського інституту сталевих конструкцій [6].

У подальших дослідженнях моделі відсіків балок піддавалися уточненню і доповненню. Зокрема, Т. Фуїї доповнює модель Баслера-Тюрлімана пластичними шарнірами в кутах і в середині відсіку у верхньому поясі, що утворюються в граничному стані, а у роботах К.С. Рокея та М. Скалоуд'а кут нахилу діагональної складки співпадає з кутом нахилу геометричної діагоналі відсіку.

Деяке узагальнення основних розрахункових положень описаного вище методу пропонується в роботах Б.М. Броуде та Б.І. Мойсеєва. Розрахункове граничне зсувне навантаження на балку знижується при цьому на 3...5%. Уточненню розглянутої моделі присвячені також окремі праці М.В. Предтеченського, І.К. Погодаєва, М.Д. Корчака, В.В. Каленова. За результатами досліджень було розроблено «Руководство по проектированию стальных тонкостенных балок», яке стало першим нормативним документом щодо розрахунку і проектування тонкостінних балок постійного перерізу на теренах СНД.

Методи досліджень другого напрямку зводяться до вирішення рівнянь рівноваги і сумісності деформацій Кармана-Маргера для гнучкої пружної пластинки з урахуванням початкових недосконалостей з відповідними граничними умовами, прийнятими від шарнірного спирання до повного защемлення. Прогнозування поведінки стінок при згині, що цілком природно, ґрунтується на основі експериментальних даних, але розрахункова модель є більш точною та обґрунтованою. Відомими роботами цього напрямку, що отримали практичне застосування, є дослідження J. Djubek'a, І.І. Ааре, Ю.Р. Лепіка, А.А. Євстратова. Слід відзначити підвищену складність завдання в даній постановці. Це стосується не тільки виведення рівнянь, що вимагають трудомістких математичних обчислень, але і реалізації отриманих рівнянь на ПК.

В рамних елементах за високих значень відносних ексцентриситетів, як і в балкових конструкціях, втрата стінки відбувається в стиснутій зоні перерізу і бічні випинання стінки набувають максимальних значень біля стиснутої полиці на відстані  $\sim 0,3h$ . Причиною такого ефекту є те, що розтягнута полиця з досить високим рівнем напружень перешкоджає втраті стійкості прикріпленої до неї стінки, через що бічні випучування сконцентровуються ближче до стиснутої полиці і приводять до виключення стінки із роботи. Через необхідність забезпечення умови рівноваги перерізу це сприяє підвищенню рівня напружень в стиснутому поясі. Такий висновок зроблено на основі чисельних досліджень ряду моделей рам з гнучкою стінкою (рис. 1).

Для стиснуто-зігнутих двотаврових конструкцій з гнучкою стінкою запропоновано 2 розрахункові моделі перерізу. Перша модель відповідає роботі тонкостінних двотаврів умовної гнучкості стінки 8...12 – середня частина стінки виключається з роботи і враховується лише ділянка висотою  $h_{wred} = 0,85t_w \sqrt{E/R_y}$  у стиснутій зоні та вдвічі більше в розтягнутій (рис. 2, а).

Для другої розрахункової моделі, коли значення умовної гнучкості стінок знаходиться в межах 6–8, припускаємо, що середня частина хоч і втрачає стійкість, але все одно сприймає нормальні напруження в закритичній стадії роботи (рис. 2, б). При цьому жорсткість стінки зменшується, тож пропонується вводити експериментальний редукційний коефіцієнт для зменшення товщини стінки.

В розрахункових моделях також прийнято, що при дії всіх трьох складових напружено-деформованого стану несуча спроможність досягає граничного стану за умови, що в стиснутій полиці двотавра розвиваються пластичні деформації, а втрата стійкості стінки має несиметричну форму. Такому випадку відповідає модель граничного стану, за якої нормальні напруження розподіляються за законом трикутника і дорівнюють відповідно  $R_y$  в стиснутій зоні і  $(R_y - N/A_{red})$  у розтягнутій (рис. 2).

Враховуючи загальний підхід за будівельними нормами для елементів рам при відносному ексцентриситеті  $m_x \geq 15$  пропонується використовувати таку умову міцності рамних елементів з гнучкою стінкою:

$$\left| \frac{N}{N_u} \right| + \left( \frac{M_x}{M_{uф}} \right)^2 + \left( \frac{Q}{Q_u} \right)^4 \leq \gamma_c \quad (1)$$

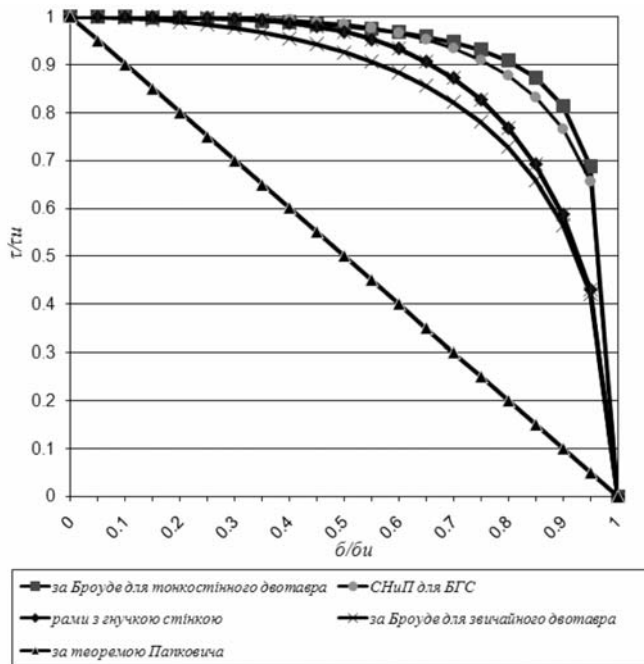


Рис. 3. Криві вичерпання несучої здатності тонкостінного перерізу за методиками СНиП [1], Броуде-Мойсеева, Папковича та за запропонованою методикою для рамних двотаврів

У формулі (2)  $N$ ,  $M_x$ ,  $Q$  – зусилля, що діють у перерізі,  $N_u$ ,  $M_{up}$ ,  $Q_u$  – відповідні граничні значення зусиль.

Граничне значення згинального моменту:

$M_{u\phi} = R_y \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) W_{xred}$ , де  $W_{xred}$  – момент опору послабленого перерізу, що залежить від обраного типу розрахункової моделі перерізу.

Граничне значення стискаючої сили:

$N_u = \phi A_{red} R_y$ ,  $A_{red}$  – площа послабленого перерізу, що залежить від обраного типу розрахункової моделі перерізу.

Значення критичних дотичних напружень і граничного значення поперечної сили і пропонується вираховувати за відповідними формулами розділу 18 СНиП II-23-81\* як для балки з гнучкою стінкою.

$$Q_u = R_s t_w h_w \left[ \frac{\tau_{cr}}{R_s} + 3,3 \left( 1 - \frac{\tau_{cr}}{R_s} \right) \frac{\beta \mu}{1 + \mu^2} \right]$$

Коефіцієнт умов роботи  $\gamma_c$ , враховуючи складну роботу елементів змінної жорсткості з гнучкою стінкою, слід обмежити значенням 0,95.

Запропонована методика перевірки розрахункової умови міцності елемента рами з гнучкою стінкою (2) апробована та підтверджена проведенням експериментальних випробувань.

Якщо побудувати криві вичерпання несучої здатності тонкостінних перерізів (рис. 3) при сумісній дії нормальних та перерізуючих зусиль, то буде видно, що крива в рамних елементах опускається нижче за балкові, тобто наявність стискаючої сили досить суттєво

впливає на характер вичерпання несучої здатності. При збільшенні значення стискаючого зусилля (у випадку конструкцій з меншими ексцентриситетами  $m_{ef} < 15$ ) крива опускається ще нижче, тож ефективність тонкостінних конструкцій в такому випадку є сумнівною – при малих відносних ексцентриситетах слід застосовувати конструкції з традиційною гнучкістю стінки.

Таким чином, ефективність застосування тонкостінних двотаврів у рамних конструкціях дещо нижча, ніж у балках, але все одно забезпечує до 17% економії металу порівняно з аналогічними перерізами з традиційною гнучкістю стінки. Несучу здатність тонкостінних рамних конструкцій зі зварних двотаврів з гнучкою стінкою постійної чи змінної жорсткості можна формалізувати, використовуючи феноменологічні підходи Броуде-Мойсеева та Баслера-Тюрлімана. На основі власних експериментально-теоретичних досліджень розроблено та апробовано умову міцності рамних конструкцій з гнучкою стінкою при високих значеннях відносних ексцентриситетів. Virшення цієї актуальної задачі дозволяє підвищити конкурентну спроможність вітчизняних металевих конструкцій на світовому ринку будівельної галузі, адже дозволяє виготовляти технологічно прості, надійні та ефективні каркаси універсального призначення при збереженні традиційних технологій виготовлення за рахунок урахування внутрішнього ресурсу конструктивних систем.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции. Нормы проектирования / Госстрой СССР / [действующий с 1982-01-01]. – М., ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
2. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу / Мінрегіонбуд України / [чинний з 2011-12-01]. – К., ДП Укрархбудінформ, 2011. – 202 с.
3. Склярів І.О., Білик С.І. Рациональна висота перерізу двотаврових рамних конструкцій змінної жорсткості з гнучкою стінкою / Сборник научных трудов «Современные строительные конструкции из металла и древесины» ОГАСА №14 – Ч. 1. – Одеса, ООО «Внешрекламсервис», 2010. – С. 230-235.
4. Склярів І.О., Білик С.І. Реалізація принципу концентрації матеріалу на прикладі проектування рамних конструкцій змінного перерізу з двотаврів з гнучкою стінкою / Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. Вип. 7. – К.: Вид-во «Сталь», 2011. – С. 78-86.
5. Basler K. Vollwandtrager-berechnung im uberkritischen bereich / K. Basler // Schweizer Stahlbauvereinigung – Zurich, 1968. – P. 235-248. [6]. Specification for the Design, Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings / American Institute of Steel Construction / [valid from 1969-02-12]. – New York, 1969. – 262 p.